

## Термическая стойкость экранов однофазных силовых кабелей при коротких замыканиях

к.т.н. Дмитриев М.В. (ЗАО «Завод энергозащитных устройств»)

д.т.н. Евдокунин Г.А (СПбГПУ)

В настоящее время наибольшее распространение получают силовые кабельные передачи 6-500 кВ с однофазными кабелями, сечение которых показано на рис.1. При этом наиболее часто экраны кабелей заземляют одновременно в обоих концах (рис.2), что в нормальных и аварийных режимах приводит к протеканию в экранах токов, сопоставимых с током жилы [1,2]. Поэтому эксплуатация трехфазной группы однофазных кабелей без принятия мер по снижению токов в экранах до приемлемых значений не должна допускаться. В качестве таких мер в [1,2] предложено секционирование экранов (рис.3) или транспозиция экранов (рис.4).

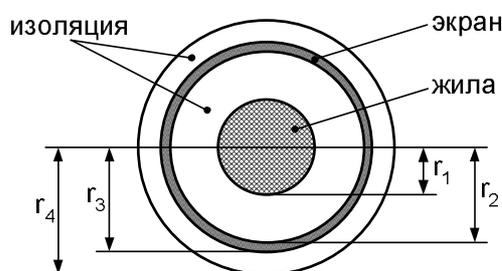


Рис.1. Однофазный кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена.

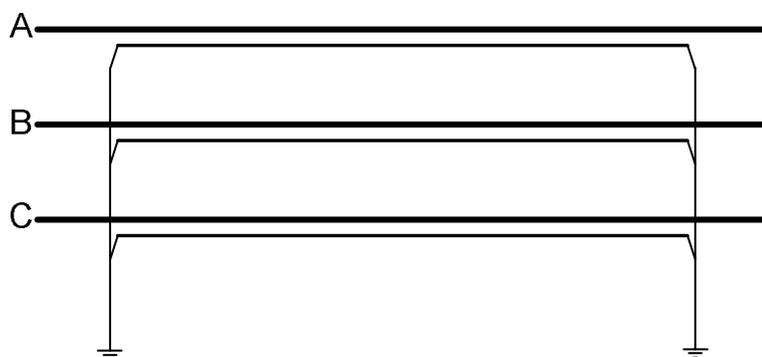


Рис.2. Группа из трех однофазных кабелей, экраны которых заземлены по концам.

В ранних публикациях [1,2] выбор схемы соединения и заземления экранов рассматривался, главным образом, с точки зрения необходимости снижения токов в экранах в нормальном симметричном режиме работы кабеля, а также при внешних (по отношению к кабелю) коротких замыканиях. Кроме того, там были проанализированы допустимость той или иной схемы с точки зрения уровня напряжения в узлах транспозиции или на разомкнутом конце экрана.

В этой статье мы предлагаем вниманию читателей анализ различных способов обустройства экранов для снижения в них токов при внутренних коротких замыканиях в самом кабеле. В качестве одного из таких способов в [3]

рекомендуется использовать объединение экранов фаз кабеля – так называемую «скрутку» экранов, эффективность которой мы и проанализируем далее.

### 1. Внутреннее короткое замыкание в кабеле

Именно внутренние короткие замыкания в кабеле являются определяющими при формулировании требований к термической стойкости экранов, поскольку:

- при внутренних повреждениях токи в экранах протекают всегда, тогда как при внешних коротких лишь в некоторых случаях;
- для радиальной сети в качестве внешних коротких замыканий рассматриваются повреждения изоляции у потребителя, сопровождаемые меньшими токами, нежели при внутренних повреждениях в непосредственной близости от центра питания.

При внутреннем повреждении изоляции «фаза-экран» кабеля в том случае, если уже выполнено секционирование или транспозиция экранов, как видно из рис.3-4, не имеет значения транспонирован ли или частично разземлен экран кабеля. При этом повреждении ток короткого замыкания  $I_K$  из жилы попадает в экран и далее в заземляющее устройство экрана, т.е. протекает по экрану. Если сечение экрана  $F_{\Sigma}$  не соответствует величине тока  $I_K$  и длительности его протекания, то возможно термическое разрушение экрана на значительном по длине  $L$  отрезке кабеля. Частичное разземление экранов (рис.3) или транспозиция (рис.4) не являются основанием для снижения сечения экранов, несмотря на то, что при внешних коротких замыканиях транспозиция существенно снижает токи в экранах [1], а при частичном заземлении экранов они равны нулю.

Короткие замыкания в начале или в конце кабеля могут сопровождаться протеканием в экранах различных токов. Например, если сеть радиальная, то короткое замыкание вблизи от нагрузки сопровождается протеканием в экранах меньших по величине токов, нежели при коротком замыкании вблизи от центра питания. При выборе сечения экрана кабеля и проверке его термической стойкости необходимо ориентироваться на большее из двух значений токов короткого замыкания.

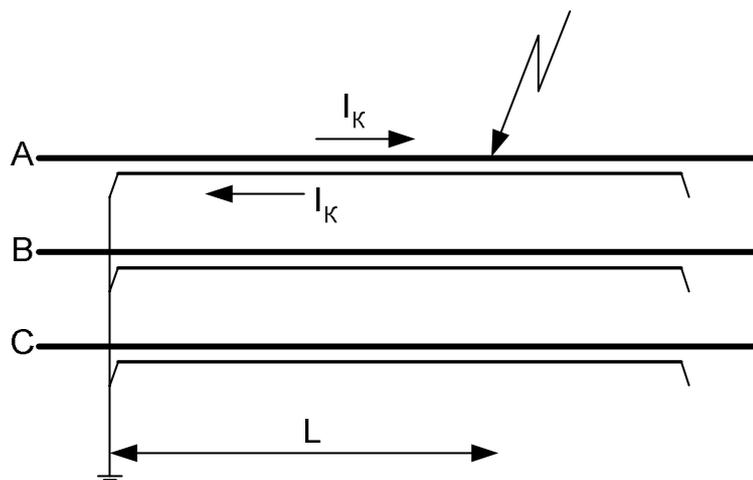


Рис.3. Повреждение изоляции кабеля, экран которого частично разземлен.

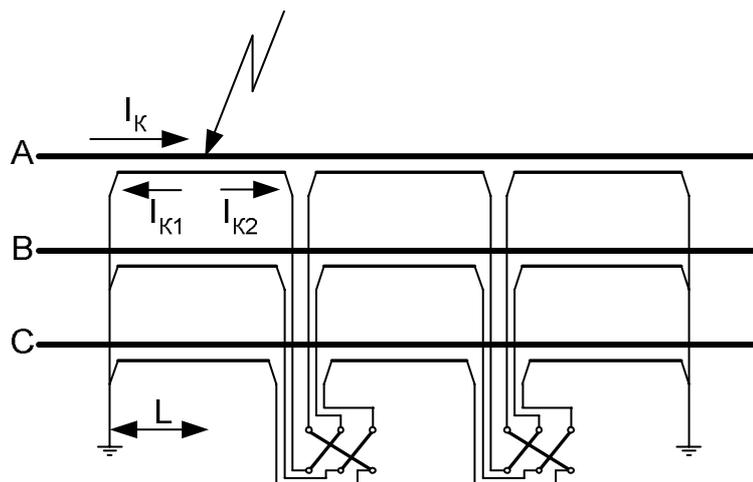


Рис.4. Повреждение изоляции кабеля, экран которого заземлен по концам и применена транспозиция экранов.

Итак, с точки зрения термической стойкости экранов более тяжелым является короткое замыкание в кабеле, нежели короткое замыкание в сети вне кабеля.

Традиционно в сетях рассматриваются различные виды коротких замыканий (к.з.): К(1), К(1,1), К(2), К(3). Говоря о коротком замыкании в однофазном кабеле и выборе сечения экрана, полагается повреждение изоляции «жила-экран». Следовательно, так как экран заземлен, двухфазное без земли короткое замыкание К(2) внутри кабеля принципиально невозможно. Крайне маловероятным является трехфазное повреждение изоляции кабеля К(3), и его также следует исключить из рассмотрения.

Из двух оставшихся видов повреждения изоляции однофазное К(1) является расчетным при выборе сечения экрана в сетях с заземленной нейтралью (110 кВ и выше), поскольку в сетях с изолированной нейтралью (6-35 кВ) оно сопровождается протеканием лишь емкостных токов.

Таблица 1. Основные расчетные случаи для выбора сечения экрана.

Кабель	Состояние экранов	Расчетный случай
6-35 кВ	любое	Двойное К(1,1) (одно из двух повреждений изоляции находится в рассматриваемом кабеле)
110-500 кВ	любое	К(1) (повреждение изоляции находится в рассматриваемом кабеле)

В сетях с изолированной нейтралью расчетным при выборе сечения экрана является двойное повреждение изоляции К(1,1), причем наиболее вероятным является повреждение изоляции двух фаз различных присоединений, как это показано на рис.5. Рассмотренная на рис.5 ситуация

обычно развивается следующим образом: происходит однофазное замыкание одной из фаз в точке А и под воздействием перенапряжений на «здоровых» фазах в другом месте происходит повреждение одной из «здоровых» фаз (точка В).

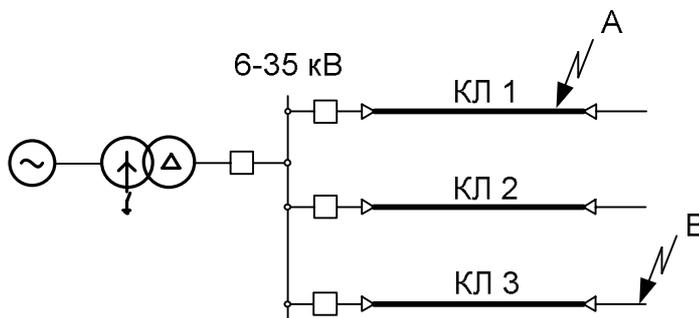


Рис.5. Двойное повреждение изоляции в кабельной сети с изолированной нейтралью.

В [2] расчетным в сетях с заземленной нейтралью называлось внешнее К(1), а в сетях с изолированной нейтралью – внешнее К(3). Здесь нет противоречия с данными табл.1, поскольку сейчас речь идет о выборе сечения экрана, а в [2] определению подлежало напряжение на экране относительно земли.

Рассмотрим далее «скрутку» экранов (рис.9), позволяющую по мнению авторов [3] снизить токовые воздействия на экраны кабелей при внутренних к.з. Поскольку для значительной части однофазных кабелей, уже проложенных в сетях (особенно в сетях 6-10 кВ), не применялось специальных мер [1,2] по снижению токов нормального режима в экранах, то рассмотрим короткое замыкание внутри группы однофазных кабелей, экраны которых заземлены по концам (рис.2). Кроме того, именно для такого способа обустройства экранов в [3] и предлагается «скрутка».

Для нижеследующей оценки эффективности «скрутки» вначале определим распределение токов по экранам в ее отсутствие.

## 2. Распределение токов в экранах при отсутствии «скрутки»

Получим аналитические выражения для токов в экранах в случае повреждения изоляции «жила-экран» одной из фаз трехфазной группы однофазных кабелей в сети с заземленной нейтралью. Результаты можно распространить на случай двойного к.з. К(1,1) для сети с изолированной нейтралью (см. рис.5).

Пусть повреждение изоляции «жила-экран» фазы «А» кабеля длиной  $L_K$  произошло на расстоянии  $L_{K1}$  от его начала (на расстоянии  $L_{K2} = L_K - L_{K1}$  от его конца). Условные положительные направления токов показаны на рис.6.

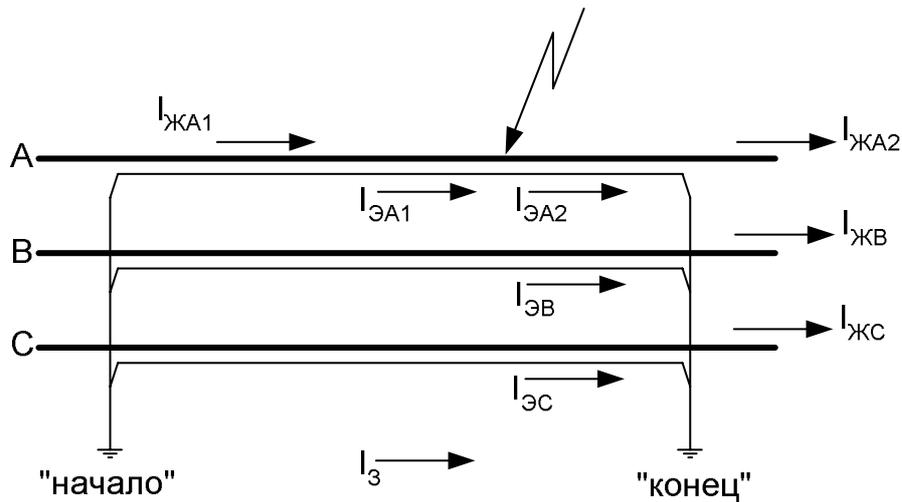


Рис.6. Повреждение изоляции «жила-экран» фазы «А» в группе из трех однофазных кабелей.

Как правило, токи нагрузки заметно меньше величины тока однофазного короткого замыкания  $i_{ЖА1}$ , т.е.  $i_{ЖА2} \ll i_{ЖА1}$ ,  $i_{ЖВ} \ll i_{ЖА1}$ ,  $i_{ЖС} \ll i_{ЖА1}$ . Поэтому допустимо считать  $i_{ЖА2} = 0$ ,  $i_{ЖВ} = 0$ ,  $i_{ЖС} = 0$ .

Система уравнений, описывающая процессы в экранах, по аналогии с системой (1) из [1], может быть записана следующим образом

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\text{ЭА}} &= \dot{Z}_{ЖЭ1} i_{ЖА1} + \dot{Z}_{Э1} i_{\text{ЭА1}} + \dot{Z}_{Э2} i_{\text{ЭА2}} + \dot{Z}_К i_{\text{ЭВ}} + \dot{Z}_К i_{\text{ЭС}} \\ \Delta \dot{U}_{\text{ЭВ}} &= \dot{Z}_{К1} i_{ЖА1} + \dot{Z}_{К1} i_{\text{ЭА1}} + \dot{Z}_{К2} i_{\text{ЭА2}} + \dot{Z}_{\text{Э}} i_{\text{ЭВ}} + \dot{Z}_К i_{\text{ЭС}}, \\ \Delta \dot{U}_{\text{ЭС}} &= \dot{Z}_{К1} i_{ЖА1} + \dot{Z}_{К1} i_{\text{ЭА1}} + \dot{Z}_{К2} i_{\text{ЭА2}} + \dot{Z}_К i_{\text{ЭВ}} + \dot{Z}_{\text{Э}} i_{\text{ЭС}} \end{aligned}$$

где индекс «1» у сопротивлений означает, что они относятся к участку кабеля длиной  $L_{К1}$ , индекс «2» – для участка кабеля длиной  $L_{К2}$ , отсутствие цифрового индекса – для всего кабеля длиной  $L_К = L_{К1} + L_{К2}$ .

Дополнительно можно записать  $\Delta \dot{U}_{\text{ЭА}} = \Delta \dot{U}_{\text{ЭВ}} = \Delta \dot{U}_{\text{ЭС}} = 0$  (поскольку экраны заземлены по концам кабеля),  $i_{ЖА1} = i_{\text{ЭА2}} - i_{\text{ЭА1}}$  (весь ток короткого замыкания из жилы попадает в экран),  $i_{\text{ЭВ}} = i_{\text{ЭС}}$  (из условий симметрии).

После решения системы токи в схеме рис.6 по отношению к току короткого замыкания  $i_{ЖА1}$  определяются следующими выражениями:

$$\frac{i_{\text{ЭА2}}}{i_{ЖА1}} = \frac{\dot{Z}_{\text{Э}} - \dot{Z}_{ЖЭ}}{\dot{Z}_{\text{Э}} - \frac{2\dot{Z}_К^2}{\dot{Z}_{\text{Э}} + \dot{Z}_К}} \cdot \frac{L_{К1}}{L_К}, \quad (1.1)$$

$$\frac{i_{\text{ЭВ}}}{i_{ЖА1}} = \frac{i_{\text{ЭС}}}{i_{ЖА1}} = -\frac{\dot{Z}_К}{\dot{Z}_{\text{Э}} + \dot{Z}_К} \cdot \frac{\dot{Z}_{\text{Э}} - \dot{Z}_{ЖЭ}}{\dot{Z}_{\text{Э}} - \frac{2\dot{Z}_К^2}{\dot{Z}_{\text{Э}} + \dot{Z}_К}} \cdot \frac{L_{К1}}{L_К}, \quad (1.2)$$

$$\frac{i_{\text{ЭА1}}}{i_{ЖА1}} = \frac{i_{\text{ЭА2}}}{i_{ЖА1}} - 1. \quad (1.3)$$

Ток в земле находится из условия  $i_3 + i_{\text{ЭА2}} + i_{\text{ЭВ}} + i_{\text{ЭС}} = 0$

$$\frac{i_3}{i_{ЖА1}} = -\frac{\dot{Z}_{\text{Э}} - \dot{Z}_К}{\dot{Z}_{\text{Э}} + \dot{Z}_К} \cdot \frac{\dot{Z}_{\text{Э}} - \dot{Z}_{ЖЭ}}{\dot{Z}_{\text{Э}} - \frac{2\dot{Z}_К^2}{\dot{Z}_{\text{Э}} + \dot{Z}_К}} \cdot \frac{L_{К1}}{L_К}. \quad (1.4)$$

Можно показать, что выражения (1.1)-(1.3) для токов в экранах при коротком замыкании К(1) в сети сразу за кабелем (при  $L_{К1} = L_K$ ) в точности соответствуют формулам из [1] для токов  $i_{ЭА}$ ,  $i_{ЭВ}$ ,  $i_{ЭС}$  в экранах при внешнем коротком замыкании, при этом справедливо  $i_{ЭА1} = i_{ЭА}$ .

### Пример расчета

Воспользуемся формулами (1.1)-(1.4) для расчета токов в экранах кабелей в сети с изолированной нейтралью 10 кВ. При этом под  $i_{ЖА1}$  будем понимать ток К(1,1) двойного на землю короткого замыкания (первое повреждение – в фазе «А» рассматриваемого кабеля, второе повреждение – в фазе «В» или «С» в ином месте сети вне рассматриваемого кабеля).

Проведем расчеты для кабеля 500/95 мм<sup>2</sup> из [2] и кабеля 240/50 мм<sup>2</sup> из [3]. «Геометрия» кабеля (рис.1) может быть определена при известных сечениях жилы  $F_{Ж}$  и экрана  $F_{Э}$ , а также толщины  $d_{ЖЭ}$  изоляции «жила-экран»:

$$r_1 = \sqrt{\frac{F_{Ж}}{\pi}}, \quad r_2 = r_1 + d_{ЖЭ}, \quad r_3 = \sqrt{r_2^2 + \frac{F_{Э}}{\pi}}, \quad r_4 = r_3 + d_{ЭЭ} \quad (2)$$

где для кабеля 10 кВ можно принять толщину главной изоляции  $d_{ЖЭ} = 5$  мм и толщину оболочки экрана  $d_{ЭЭ} = 5$  мм.

В расчетах будем изменять способ прокладки кабелей, т.е. соотношение  $s/d$ , где  $s$  – расстояние между осями соседних фаз,  $d = 2r_4$  – диаметр фазы. Так, случай  $s = d$  означает, что три фазы кабеля проложены вплотную треугольником; случай  $s = 10d$  не имеет практического смысла и рассмотрен для дополнительной иллюстрации зависимостей.

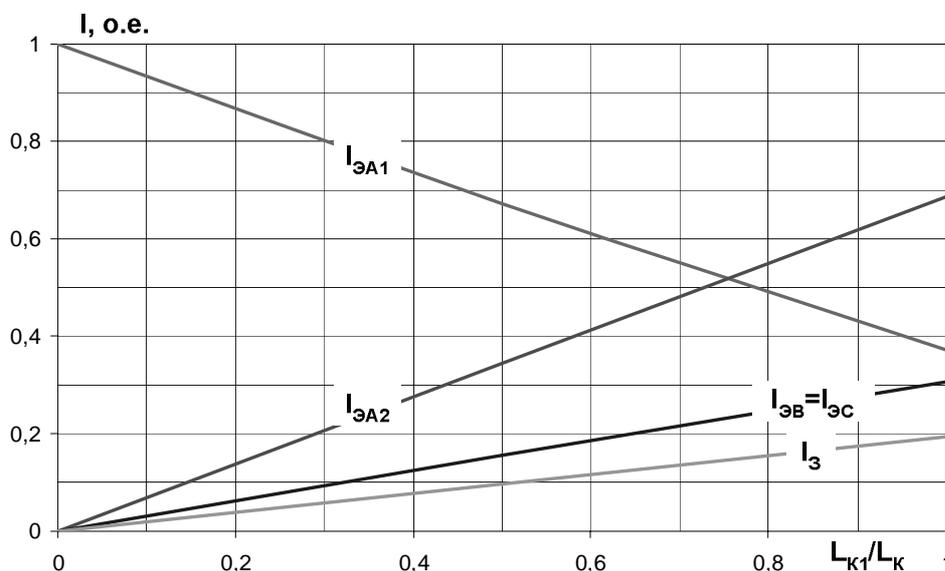


Рис 7. Результаты расчетов по формулам (1.1)-(1.4) при  $s/d = 1$  для кабеля 240/50 мм<sup>2</sup> в зависимости от соотношения  $L_{К1}/L_K$ .

На рис.7 для кабеля 240/50 мм<sup>2</sup> при  $s/d = 1$  приведены результаты расчетов модулей комплексных токов по формулам (1.1)-(1.4) в зависимости от

соотношения  $L_{K1}/L_K$ . Они получены при удельном сопротивлении грунта  $\rho_3 = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Поскольку для комплексных чисел имеет место неравенство  $|\dot{N} + \dot{M}| \leq |\dot{N}| + |\dot{M}|$ , то на рис.7 сумма модулей всех токов больше единицы.

Из рис.7 видно, что заземленные экраны неповрежденных фаз по мере приближения точки повреждения изоляции «жила-экран» к концу кабеля (от центра питания) помогают снизить ток в поврежденном экране, однако такая «помощь» отсутствует при к.з в начале кабеля – точки с наибольшим (расчетным) током к.з., когда весь ток короткого замыкания попадает в экран  $|\dot{I}_{\text{ЭА1}}| \approx |\dot{I}_{\text{ЖА1}}|$ .

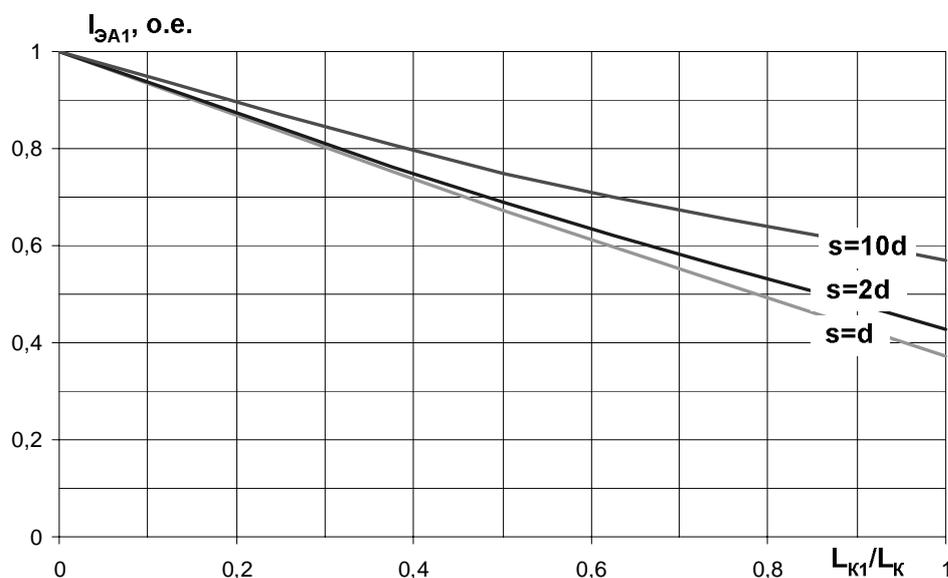


Рис 8. Результаты расчетов по формуле (1.3) для кабеля 240/50 мм<sup>2</sup> в зависимости от соотношения  $s/d$  и  $L_{K1}/L_K$ .

На рис.8 проанализировано влияние расстояния между фазами на растекание токов короткого замыкания в экранах. При увеличении расстояния зависимость  $|\dot{I}_{\text{ЭА1}} / \dot{I}_{\text{ЖА1}}| = f(L_{K1}/L_K)$  смещается в область больших токов, т.е. усиливается неравномерность распределения тока по различным участкам экрана поврежденной и неповрежденной фаз и, как следствие, усиливается термическое воздействие на наиболее нагруженный участок экрана поврежденной фазы. Поэтому для снижения термической нагрузки на экраны можно порекомендовать прокладывать однофазные кабели вплотную друг к другу треугольником. При коротких замыканиях вопросы эффективного охлаждения кабелей могут не рассматриваться, поскольку:

- нагревается, главным образом, только одна фаза;
- при малом времени существования короткого замыкания, учитывая тепловую инерцию системы, нельзя говорить об эффективном отводе тепла.

Тем не менее, вне зависимости от способа прокладки кабелей (вместе или на расстоянии), как правило, сечение экрана должно соответствовать наибольшему току короткого замыкания  $K(1)$  в сети с заземленной нейтралью или наибольшему току короткого замыкания  $K(1,1)$  в сети с изолированной нейтралью. В противном случае возможно термическое разрушение экрана на участке длиной  $L_{K1}$ .

### 3. Распределение токов в экранах с учетом «скрутки»

Величины токов короткого замыкания в кабельной сети 6-10 кВ могут быть значительными по сравнению с теми токами, на протекание которых рассчитаны экраны типовых применяемых кабелей. Так, согласно [3] типовыми кабелями в кабельной сети Мосэнерго являются однофазные кабели 240/50 мм<sup>2</sup>, термическая стойкость экранов которых обеспечивается при токах короткого замыкания не более 10 кА при времени протекания не более 1 сек.

В случае, если токи и длительность их протекания более указанных значений, требуется соразмерное увеличение сечения экрана, приводящее к удорожанию кабеля. В [3] в тех случаях, где вопросы термической стойкости приводят к необходимости увеличения сечения экрана сверх типовых соотношений  $F_{\text{э}} / F_{\text{ж}}$ , предлагается выполнять объединение экранов («скрутку») в каждой соединительной муфте (схема рис.9). Такое объединение, как отмечается в [3], приводит к образованию параллельных ветвей и растеканию токов короткого замыкания через экраны фаз, не затронутых повреждением, что снижает термическую нагрузку экрана поврежденной фазы.

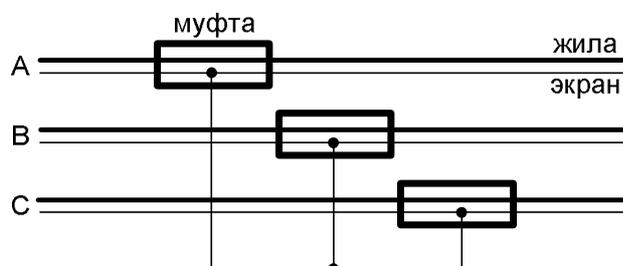


Рис.9. Объединение экранов однофазных кабелей в соединительных муфтах (без заземления общей точки) с целью снижения термической нагрузки на экраны при коротких замыканиях.

Несложно показать, что схема обустройства экранов рис.9 никак не повлияет на токи в экранах кабеля в нормальном симметричном режиме, и они по-прежнему могут составлять существенную долю токов в жилах. Для обоснования того, что схема рис.9 позволяет снизить токи в экранах при внутренних коротких замыканиях, авторы [3] пытаются доказать, что распределение токов в экранах определяется только их активными сопротивлениями. При этом вместо рассмотрения собственных и взаимных активно-индуктивных сопротивлений жилы, экрана, соседних фаз, авторы [3] упоминают лишь собственное активно-индуктивное сопротивление экрана, при вычислении которого используют ошибочную формулу для погонной индуктивности экрана.

Допущение [3] заметно упрощает рассмотрение вопросов растекания в экранах тока короткого замыкания, однако в общем случае является неверным – распределение токов между экранами зависит как от активных, так и от индуктивных (собственных и взаимных) сопротивлений кабеля (см. (1.1)-(1.3)).

### 3.1. Короткое замыкание в начале кабеля

Предположим, что группа из трех однофазных кабелей имеет лишь две строительных длины, т.е. одну соединительную муфту с объединенными (но не заземленными) в ней экранами. Рассмотрим короткие замыкания на первой и на второй строительных длинах.

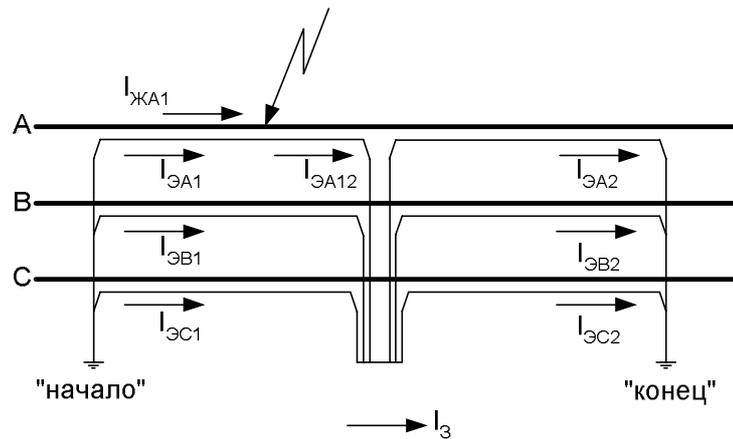


Рис.10. Близкое к «началу» кабеля повреждение изоляции «жила-экран» фазы «А» в группе из трех однофазных кабелей, экраны которых объединены в соединительной муфте.

Система уравнений для падений напряжения на экранах кабеля может быть записана с учетом  $\dot{I}_{ЭВ2} = \dot{I}_{ЭС2}$  как

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{ЭА2} &= \dot{Z}_{Э2} \dot{I}_{ЭА2} + 2\dot{Z}_{К2} \dot{I}_{ЭВ2} \\ \Delta \dot{U}_{ЭВ2} &= \dot{Z}_{К2} \dot{I}_{ЭА2} + (\dot{Z}_{Э2} + \dot{Z}_{К2}) \dot{I}_{ЭВ2} \end{aligned}$$

где индекс «2» у сопротивлений означает, что они относятся к участку кабеля длиной  $L_{К2} = 0.5L_K$  от соединительной муфты до его «конца».

Поскольку экраны объединены, справедливо  $\Delta \dot{U}_{ЭА2} = \Delta \dot{U}_{ЭВ2} = \Delta \dot{U}_{ЭС2}$ , и тогда из системы уравнений найдем  $\dot{I}_{ЭА2} = \dot{I}_{ЭВ2} = \dot{I}_{ЭС2}$ .

По 2-му закону Кирхгофа для «конца» кабеля можно записать  $\dot{I}_з + \dot{I}_{ЭА2} + \dot{I}_{ЭВ2} + \dot{I}_{ЭС2} = 0$ . В предположение малости токов в земле  $\dot{I}_з \approx 0$  получим  $\dot{I}_{ЭА2} = \dot{I}_{ЭВ2} = \dot{I}_{ЭС2} = 0$ , откуда  $\Delta \dot{U}_{ЭА2} = \Delta \dot{U}_{ЭВ2} = \Delta \dot{U}_{ЭС2}$ . Отсюда видно, что, несмотря на отсутствие заземления экранов в соединительной муфте, напряжение в ней на экранах в относительно земли ничем не отличается от напряжения на «конце» кабеля, т.е. равно нулю. Следовательно, экраны в соединительной муфте можно считать заземленными, что позволяет рассматривать процессы в кабеле рис.10 как процессы в кабеле рис.6 длиной  $0.5L_K$ .

Для расчетов рис.10 при повреждении в начале кабеля (при  $0 \leq L_{К1} \leq 0.5L_K$ ) можно воспользоваться выражениями (1.1)-(1.4), куда подставлять не  $L_{К1}/L_K$ , а  $L_{К1}/0.5L_K$ , т.е. строить зависимость  $|\dot{I}_{ЭА1} / \dot{I}_{ЖА1}| = f(2L_{К1}/L_K)$ .

### 3.2. Короткое замыкание в конце кабеля

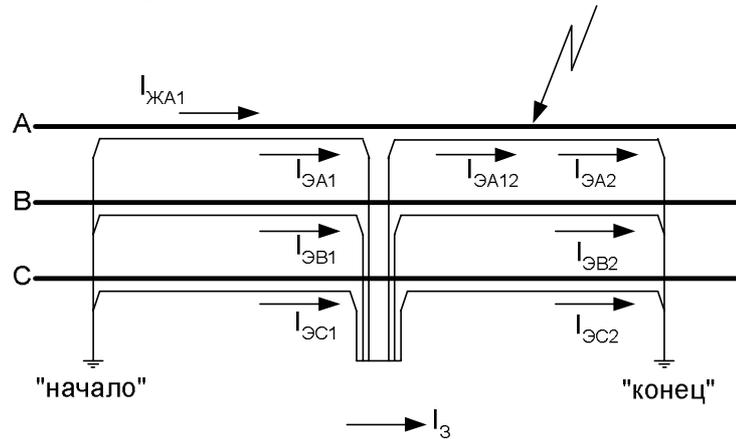


Рис.11. Близкое к «концу» кабеля повреждение изоляции «жила-экран» фазы «А» в группе из трех однофазных кабелей, экраны которых объединены в соединительной муфте.

Система уравнений для падений напряжения на экранах кабеля может быть записана с учетом  $\dot{I}_{ЭВ1} = \dot{I}_{ЭС1}$  как

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{ЭА1} &= \dot{Z}_{ЖЭ1} \dot{I}_{ЖА1} + \dot{Z}_{Э1} \dot{I}_{ЭА1} + 2\dot{Z}_{К1} \dot{I}_{ЭВ1} \\ \Delta \dot{U}_{ЭВ1} &= \dot{Z}_{К1} \dot{I}_{ЖА1} + \dot{Z}_{К1} \dot{I}_{ЭА1} + (\dot{Z}_{Э1} + \dot{Z}_{К1}) \dot{I}_{ЭВ1} \end{aligned}$$

где индекс «1» у сопротивлений означает, что они относятся к участку кабеля длиной  $L_{К1} = 0.5L_K$  от «начала» кабеля до соединительной муфты.

Поскольку экраны объединены, справедливо  $\Delta \dot{U}_{ЭА1} = \Delta \dot{U}_{ЭВ1} = \Delta \dot{U}_{ЭС1}$ , что позволяет найти соотношение токов

$$\begin{aligned} \frac{(\dot{Z}_{ЖЭ1} - \dot{Z}_{К1})}{(\dot{Z}_{Э1} - \dot{Z}_{К1})} \dot{I}_{ЖА1} + \dot{I}_{ЭА1} &= \dot{I}_{ЭВ1}, \\ \dot{D} \dot{I}_{ЖА1} + \dot{I}_{ЭА1} &= \dot{I}_{ЭВ1} = \dot{I}_{ЭС1}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $\dot{D} = \frac{\dot{Z}_{ЖЭ1} - \dot{Z}_{К1}}{\dot{Z}_{Э1} - \dot{Z}_{К1}} = \frac{\dot{Z}_{ЖЭ} - \dot{Z}_K}{\dot{Z}_Э - \dot{Z}_K}$  – комплексный коэффициент, в точности равный соотношению [1,2] тока в экране к току в жиле однофазного кабеля в нормальном симметричном режиме.

В предположение малости токов в земле  $\dot{I}_з \approx 0$  можно считать, что весь ток короткого замыкания  $\dot{I}_{ЖА1}$  возвращается по экранам, т.е.  $\dot{I}_{ЖА1} + \dot{I}_{ЭА1} + \dot{I}_{ЭВ1} + \dot{I}_{ЭС1} \approx 0$  или  $\dot{I}_{ЖА1} + \dot{I}_{ЭА1} + 2\dot{I}_{ЭВ1} = 0$ . Тогда на основе (3.1) найдем

$$\frac{\dot{I}_{ЭА1}}{\dot{I}_{ЖА1}} = -\frac{1+2\dot{D}}{3}, \quad (3.2)$$

$$\frac{\dot{I}_{ЭВ1}}{\dot{I}_{ЖА1}} = \frac{\dot{I}_{ЭС1}}{\dot{I}_{ЖС1}} = -\frac{1-\dot{D}}{3}. \quad (3.3)$$

С использованием (3.2)-(3.3) можно провести следующие рассуждения:

- при  $\dot{D} = 1$  весь ток короткого замыкания  $\dot{I}_{ЖА1}$  будет протекать по экрану аварийной фазы;

- при  $\dot{D} = 0$  ток короткого замыкания  $\dot{I}_{жк1}$  будет делиться поровну между экранами аварийной фазы и двух неповрежденных фаз.

Как видно, объединение экранов в соединительной муфте оказывается эффективным при повреждении за соединительной муфтой лишь при малых значениях  $\dot{D}$ . Согласно [2] малые значения  $\dot{D}$  достигаются лишь для некоторых кабелей и только при их прокладке вплотную друг другу треугольником.

При  $0.5L_K \leq L_{K1} \leq L_K$  любопытным является тот факт, что в пренебрежении током в земле токи в экранах согласно (3.2)-(3.3) не зависят от конкретного значения удаленности  $L_{K1}$  места повреждения изоляции от «начала» кабеля.

### Пример расчета

При оценке эффективности схемы рис.9 будем полагать, что токи короткого замыкания  $\dot{I}_{жк1}$  практически не изменяются после объединения экранов.

Результаты расчетов по формулам (1) и (3) представлены на рис.12-13 и позволяют оценить целесообразность объединения («скрутки») экранов, которая определяется площадью показанных на рисунках треугольников, образованных кривыми 1 и 2. Чем больше площадь треугольника, тем сильнее объединение экранов позволяет снизить токи в наиболее нагруженном участке экрана аварийной фазы кабеля. Видно, что если объединение экранов дает определенный результат для кабеля  $240/50 \text{ мм}^2$  при прокладке треугольником, то для кабеля  $500/95 \text{ мм}^2$  результат уже менее заметен, особенно если фазы кабеля проложены не вплотную, а на расстоянии друг от друга.

Можно показать, что, например, для кабеля  $1000/185 \text{ мм}^2$  объединение экранов еще менее эффективно. Однако, как правило, в таких кабелях термическая стойкость экранов обеспечивается и без принятия каких-либо специальных мер.

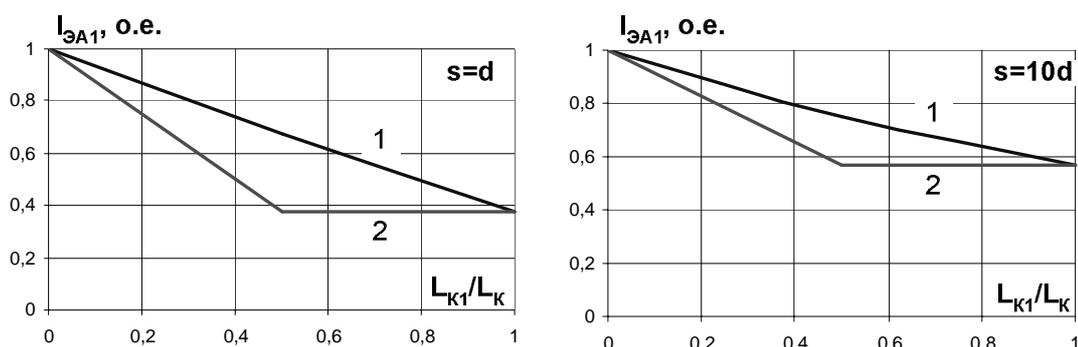


Рис.12. Оценка эффективности снижения тока в экране аварийной фазы за счет объединения экранов кабеля  $240/50 \text{ мм}^2$  в соединительной муфте. Варьируются соотношения  $s/d$  и  $L_{K1}/L_K$ . Кривая 1 – без объединения, кривая 2 – после объединения.

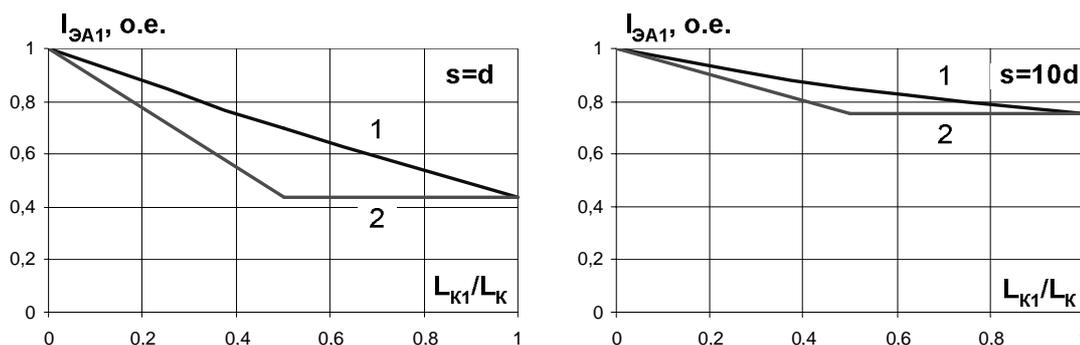


Рис.13. Оценка эффективности снижения тока в экране аварийной фазы за счет объединения экранов кабеля 500/95 мм<sup>2</sup> в соединительной муфте. Варьируются соотношения  $s/d$  и  $L_{К1}/L_{К}$ . Кривая 1 – без объединения, кривая 2 – после объединения.

Как видно из рис.12-13, наличие «скрутки» незначительно изменяет ток при к.з. внутри кабеля в точках, близких к его началу (точка с максимальным током) и, следовательно, в общем случае это мероприятие не является эффективным средством снижения расчетного тока термической стойкости экрана кабеля. Относительно большое снижение тока имеет место лишь в частном случае – для кабелей с малым сечением жилы и при расположении фаз в виде треугольника с малым значением расстояния  $s$  между фазами.

В данном примере нелишне напомнить, что заземление экранов с двух сторон независимо от наличия «скрутки» приводит к дополнительным потерям мощности в экранах и дополнительному нагреву его изоляционных элементов. Так в табл.2 для нормального симметричного режима даны соотношения токов  $I_{\text{Э}}/I_{\text{Ж}}$  и активных потерь мощности в экране и жиле  $P_{\text{Э}}/P_{\text{Ж}}$ .

Величина  $D = |\dot{D}|$ , кроме того, позволяет оценить по формулам (3.2)-(3.3) токи в экранах при коротких замыканиях в условиях рис.11.

Таблица 2. Токи и потери в экране кабеля 10 кВ в нормальном режиме работы

Расстояние $s$ между осями фаз	$D =  \dot{I}_{\text{Э}} / \dot{I}_{\text{Ж}} $				$P_{\text{Э}} / P_{\text{Ж}}$	
	240/50мм <sup>2</sup>	500/95мм <sup>2</sup>	240/50мм <sup>2</sup>	500/95мм <sup>2</sup>	240/50мм <sup>2</sup>	500/95мм <sup>2</sup>
$d$	0.039	0.047	0.160	0.281	0.123	0.414
$2d$	0.077	0.094	0.262	0.447	0.329	1.050
$10d$	0.386	0.469	0.464	0.700	1.034	2.577

Из табл.2 видно, что при прокладке кабелей малого сечения жилы  $F_{\text{Ж}}$  вплотную друг к другу токи в экранах снижены, а потери в экранах лишь незначительно увеличивают общие потери в кабеле. С ростом сечения жилы  $F_{\text{Ж}}$  токи в экранах и потери в них возрастают, требуя реализации специальных мероприятий [2] по их снижению (в сетях 6-35 кВ это одностороннее заземление, двустороннее заземление и разрыв в соединительной муфте; в сетях 110 кВ и выше – это транспозиция экранов).

### Заключение

Основные выводы, которые можно сделать на основе проведенных выше расчетов и данных [1-3], приведены в таблице.

В большинстве случаев применение силовых однофазных кабелей требует повышенного внимания к обустройству их экранов! Если для кабелей с «большим» сечением жилы (условно  $F_{ж} > 240 \text{ мм}^2$ ) специальные мероприятия необходимы, прежде всего, для радикального снижения токов и потерь в экранах в нормальном режиме работы, то для кабелей с «малым» сечением жилы специальные мероприятия могут потребоваться в том числе для повышения термической стойкости экранов и снижения риска повреждения экрана кабеля на протяженном по длине участке.

Проблема	Кабели с «малым» сечением жилы	Кабели с «большим» сечением жилы
Проблема токов в экранах в нормальном режиме	В определенной мере решается за счет расположения фаз сомкнутым треугольником	Решается за счет секционирования экранов, применения транспозиции
Проблема термической стойкости при повреждениях изоляции кабеля	Решается выбором сечения экрана или отчасти облегчается применением «скрутки» экранов в соединительных муфтах	Решается выбором сечения экрана

### Литература

- [1] Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Однофазные силовые кабели 6-500 кВ//«Новости Электротехники», №2(44), 2007 г.
- [2] Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Однофазные силовые кабели 6-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена//«Новости Электротехники», №5(47), 2007 г.
- [3] Тодирка С.Н., Попов Л.В., Пельтцер В.Б. Расчет термической стойкости экранов одножильных кабелей 10 кВ с полиэтиленовой изоляцией//«Энергетик», №4, 2002 г. –с.30-31.